

令和元年6月4日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04369

研究課題名(和文)任意容量光OFDM通信用全光信号処理技術に関する研究

研究課題名(英文) Research on all-optical signal processing technology for flexible symbol-rate optical OFDM communication

研究代表者

瀧口 浩一 (Takiguchi, Koichi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：70633254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：可変光直交周波数分割多重(Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM)信号の分離回路として、光スターカプラ型フーリエ変換回路をベースとした2種類の構成(スイッチアレイ型、可変方向性結合器アレイ型)の提案、特性把握を行った。このうち、特性可変時の損失変動が少ないなどの優れた特性を示した可変方向性結合器アレイ型の検討を主にを行い、20～100 Gbit/sの可変光OFDM信号の分離に成功した。

また、可変光OFDM信号用アド/ドロップマルチプレクサの検討、時間レンズ型可変光OFDM信号分離回路の実現も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代の適応型光ネットワークは、チャンネル間ガードバンドを削減し、通信トラヒック、伝送距離の変動に応じてチャンネル数、チャンネル毎のシンボルレート、変調フォーマットを柔軟に変化させることによって、必要最小限の帯域を使用し、ネットワーク資源の節約を図る(ハードウェアの稼働数減少、必要仕様の緩和を実現することで、消費電力、コストを抑制)。光OFDMは、複数のサブキャリアチャンネル信号を信号シンボルレート間隔で高密度に周波数分割多重するため、適応型光ネットワークのガードバンド削減に適する。

本研究では、将来の適応型光ネットワークの実現に資する可変光OFDM信号分離回路を初めて実現した。

研究成果の概要(英文)： We proposed and researched characteristics of two demultiplexers for variable optical orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signals, which were both based on an optical star coupler-type Fourier transform circuit. The demultiplexer included an array of optical switches or an array of optical tunable couplers. We mainly investigated the tunable coupler-type optical OFDM demultiplexer, which showed better characteristics than the switch-type OFDM demultiplexer in terms of low loss variation in the tunable mode and so on. The tunable coupler-type OFDM demultiplexer could demultiplex variable optical OFDM signals ranging from 20 to 100 Gbit/s.

In addition, we also investigated an add/drop multiplexer for variable optical OFDM signals, and realized a tunable optical OFDM demultiplexer based on the time lens method.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光信号処理 集積光回路 光通信方式 光デバイス・光回路 光OFDM

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在の波長分割多重による固定グリッド・シンボルレートの光ネットワークと異なり、次世代のエラスティック(伸縮自在)などの適応型光ネットワークは、(a)チャンネル間ガードバンドを削減し、(b)通信トラフィック、伝送距離の変動に応じてチャンネル数、チャンネル毎のシンボルレート、変調フォーマットを柔軟に変化させることによって、必要最小限の帯域を使用し、ネットワーク資源の節約を図る。帯域減少によってハードウェア(レーザ、変調器、増幅器、受光器など)の稼働数減少、必要仕様の緩和を実現でき、消費電力、コストを抑制できる。

光直交周波数分割多重(Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM)は、複数のサブキャリアチャンネル信号を信号シンボルレート間隔で高密度に周波数分割多重する通信方式のため、適応型光ネットワークのガードバンド削減[上記(a)]に資する。次世代光 OFDM 通信のチャンネル毎のシンボルレートは数 10 Gsymbol/s 以上で、総容量は 100 Gbit/s を超える。従って OFDM 信号のチャンネル分離に必須な離散フーリエ変換(Discrete Fourier Transform: DFT)あるいは高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform: FFT)を無線通信と同様に電子回路で行うことは、動作速度限界、消費電力増大のため難しく、光領域での直接処理が必須である。応募者らは、小サイズ、安定、低消費電力で光領域処理が可能な光集積回路技術を駆使して光 DFT・FFT 回路を実現し、固定光 OFDM 信号の全光一括チャンネル分離技術を世界に先駆けて実現してきた(光カプラ編み込み型: Takiguchi et al. Opt. Lett. 2009, 光スターカプラ型: Takiguchi et al. Opt. Lett. 2011, 光マルチモード干渉カプラ型: Takiguchi et al. OFC2012)。しかしながら、適応型光ネットワークに必須であるチャンネル・シンボルレート可変の光 OFDM 信号の光領域での分離は、他機関での光 OFDM の検討(光導波路型: Kang et al. Opt. Express 2011, 光ファイバ型: Guan et al. OFC2014, バルク光学型: Hillerkuss et al. OFC2010)も含め未報告である。

2. 研究の目的

本研究では、数 10~数 100 へのチャンネル拡張性を有し、それに伴う回路損失、サイズ増大も少ない光スターカプラ型光 DFT 回路を主構成要素とする、光集積回路型・全光処理可変光 OFDM 信号処理回路(分離、アド/ドロップマルチプレクサ)を実現し、適応型光ネットワークの実現に光回路面から貢献することを目指す。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、以下の手順で研究を行った。

- (1)集積型可変光 OFDM 信号分離用に提案した 2 種類の構成(光スターカプラ + スイッチアレイ型、光スターカプラ + 可変方向性結合器アレイ型)の特性把握を行い、利害得失を明確化した。
- (2)(1)の検討の結果、より優れた基本特性を示す可変光 OFDM 信号分離構成について集積光回路化を行い、原理検証を行った。
- (3)(1)、(2)の検討も参考として、可変光 OFDM 信号用アド/ドロップマルチプレクサの検討を行った。
- (4)当初の予定にはなかったが、可変光 OFDM 信号の分離手法として、時間レンズ効果に基づいた光フーリエ変換回路についての検討も行った。

4. 研究成果

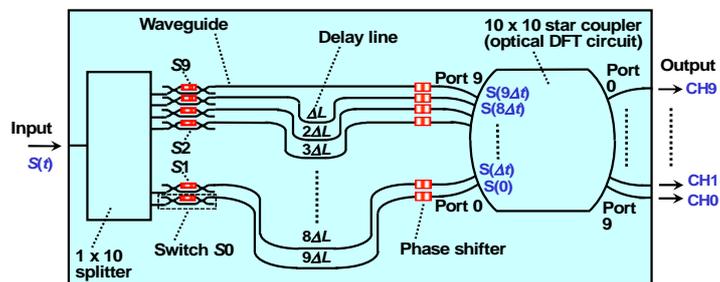
(1)集積型可変光 OFDM 信号分離回路の特性把握

可変光 OFDM 信号分離回路として、(a)光スターカプラ + スイッチアレイ型[図 1(a)]、(b)光スターカプラ + 可変方向性結合器アレイ型[図 1(b)]を考案した(最大チャンネル数 10 の場合を図示)。両回路共、以前応募者らが提案した、光スターカプラ型光 DFT 回路構成の固定光 OFDM 信号分離回路を基本として、新回路要素[(a)スイッチアレイ、(b)可変方向性結合器アレイ]を付加して可変機能を創出している。図 1 の光フィルタ構成では、光が通過する遅延線数がチャンネル数に相当し、遅延線の長さの差 ΔL はフィルタのフリースペクトルレンジ(繰返し周波数周期)FSR を決める。従って、遅延線の使用数・箇所によって分離チャンネル数・チャンネル間隔が変化するため、可変光 OFDM 信号の分離が可能となる。

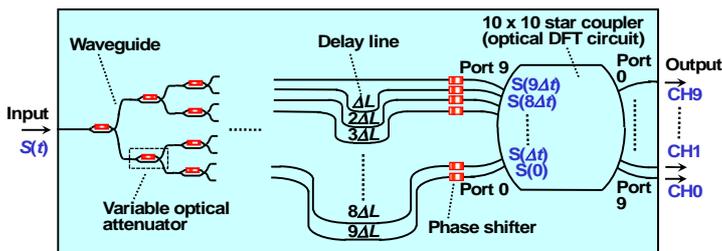
シミュレーションによる検討の結果、消光比、総シンボルレート可変範囲などの性能は両構成とも同等で、現実的なパラメータで当初の目標性能(消光比: ~30 dB、総シンボルレート可変範囲: 20~200 Gsymbol/s)を実現することは十分可能であるが、特性可変時の損失変動が問題となり、解決すべき重要課題であることがわかった。損失変動値に関しては、(b)の構成の方が小さく良好な特性を示すことを明らかにした[分離周波数シンボルレートを 10 から 50 Gsymbol/s の範囲で変化させた場合、損失変動は、(a)の構成で 14.0 dB、(b)の構成で 7.0 dB]。従って、(b)の構成を中心に研究を進めることとした。

(2)集積型可変光 OFDM 信号分離回路の実現

図 1(b)の構成を持つ可変光 OFDM 信号分離回路を、比屈折率差 $\Delta=1.2\%$ の石英光導波路を用いて作製した。スターカプラの半径、入出力導波路ピッチ、隣接遅延線間の長さの差 ΔL は、それぞれ 1.5 mm、12.6 μm 、2.07 mm と設計した。また、回路サイズは 21 x 44 mm^2 であった。図 2 に、この可変光 OFDM 信号分離回路によって実現された、(a)可変シンボルレート特性(10~50

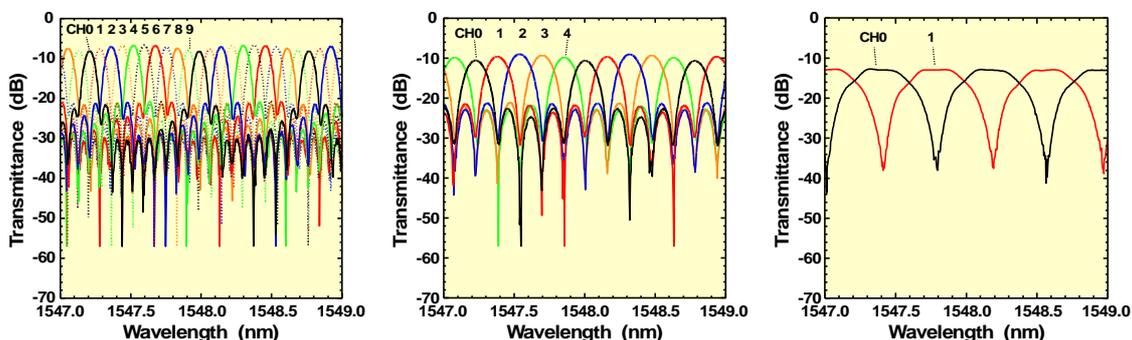


(a)スイッチアレイ型

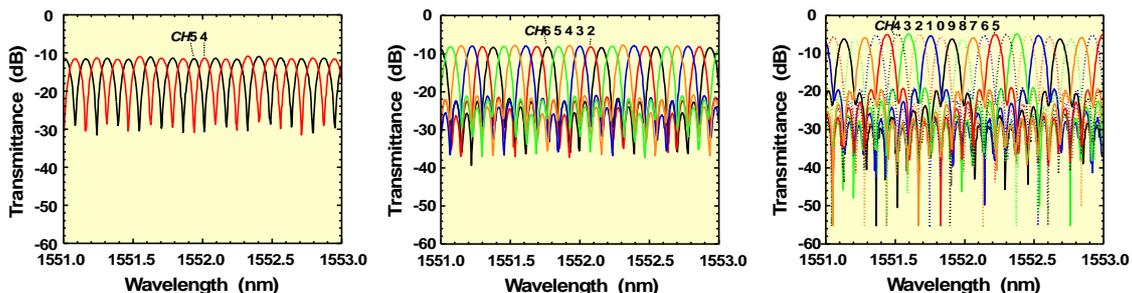


(b)可変方向性結合器アレイ型

図1 可変光 OFDM 信号分離回路



(a)可変シンボルレート特性



(b)可変チャンネル特性

図2 可変光 OFDM 信号分離回路 (光スターコプラ+可変方向性結合器アレイ型) の特性

Gsymbol/s、最大使用可能チャンネル数:10~2)、(b)可変チャンネル特性(2~10、シンボルレート:10 Gsymbol/s)を示す(いずれも強度透過特性)。いずれの場合も、フィルタの3 dB 帯域幅はほぼチャンネル間隔に一致し、チャンネル間消光比は20 dB 以上が得られ、当初予定通りの特性を達成することができ、可変光 OFDM 信号分離回路としての動作可能なことを確認した。

また、図2(b)で得られた特性を用いて、(a)20 Gbit/s (10 Gbit/s x 2CH)、(b)50 Gbit/s (10 Gbit/s x 5CH)、(c)100 Gbit/s (10 Gbit/s x 10CH)の可変チャンネル光 OFDM 信号をチャンネル分離し、分離チャンネル信号の符号誤り率特性を評価した。その結果を図3に示す。全ての分離チャンネルにおいて誤り率 10^{-10} が得られ、可変光 OFDM 信号分離回路の有効性を信号分離特性からも確認した。誤り率 10^{-9} における、単チャンネル信号入力時の特性と比較したパワーペナルティは、(a)0.6 dB、1.0 dB、(b)0.6~2.5 dB、(c)0.1~2.1 dBであった。本パワーペナルティは、フィルタの不要チャンネル消光比、光信号の矩形からのずれ、可変光 OFDM 信号分離回路の後段に配置した有効時間取出用光ゲートの不完全性などに起因すると考えられる。

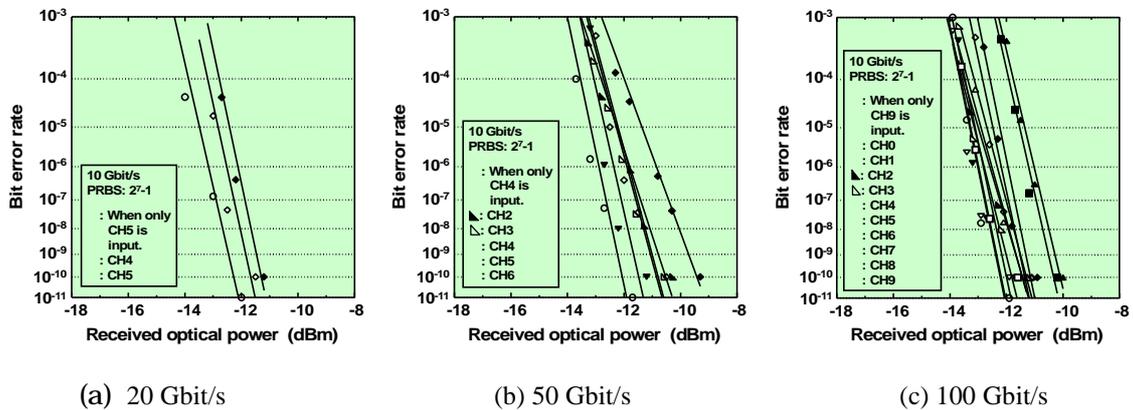


図3 可変チャネル光 OFDM 信号の分離チャネル信号の符号誤り率特性

(3)集積型可変光 OFDM 信号アド/ドロップマルチプレクサ

当初は、図 1(a)あるいは(b)の光回路を基本とし、さらに光逆 DFT 型回路を付加する構成を検討する予定であったが、ループバック型構成の光 DFT / 光逆 DFT 変換両用回路を用いたアド / ドロップマルチプレクサを新たに考案し、この検討を主に進めた。本検討は現在も継続中である。

(4)その他の成果

可変光 OFDM 信号の分離手法として、当初の予定にはなかった時間レンズ効果に基づいた光フーリエ変換回路についても検討を行った。この光フーリエ変換回路は、図 4 に示すように位相変調器と可変波長分散補償器から構成される。将来の集積光回路化を見据え、かつ広範囲の光 OFDM 信号の容量変化に精度良く対応するため、LN 位相変調器、グレーティング型可変波長分散補償器を用いた。

位相変調器駆動電圧と必要波長分散値の関係、チャネル周波数間隔と最大分離チャネル数との関係など、動作条件、現状のデバイス性能で実現可能な特性 (200 Gsymbol/s 程度までの OFDM 信号分離) をシミュレーションで明らかにした。シミュレーション結果に基づき、32~40 Gsymbol/s の範囲の可変光 OFDM 信分離実験を行い、提案手法の原理検証に成功した。位相変調器の駆動に必要な 10 GHz オーダの周期 2 次波形電圧の生成は難しいが、基本波、2 倍波発生用の同期発振器 2 台で簡単に合成できる近似波形を用いても、可変光 OFDM 信号を分離可能なことも実験的に明らかにした。

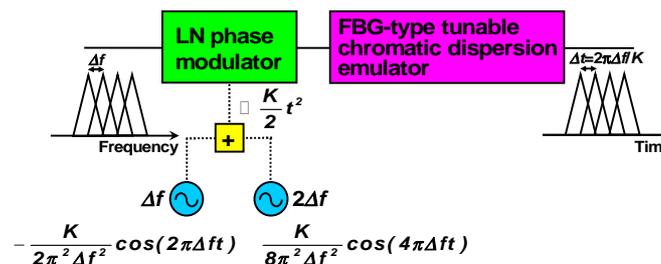


図4 時間レンズ法型可変光 OFDM 信号分離回路

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

K. Takiguchi, Chromatic dispersion tolerance of high-speed and spectral-efficient optical signal converted from terahertz-wave signal, Electronics Letters, 査読有, 55 巻, 2019, 396-398
doi: 10.1049/el.2018.8193

K. Takiguchi, Method for converting high-speed and spectrally efficient terahertz-wave signal into optical signal, Optics Express, 査読有, 27 巻, 2019, 6598-6606
doi: 10.1364/OE.27.006598

K. Takiguchi, Nyquist wavelength division multiplexing communication in terahertz-band assisted by optical technology, SPIE Proceedings, 査読無, 10917 巻, 2019, 109172D1-109172D5
doi: 10.1117/12.2514109

K. Takiguchi, Transmission characteristics of optical signal generated from high-speed and spectral-efficient signal in terahertz-band, SPIE Proceedings, 査読無, 10917 巻, 2019, 109171Y1-109171Y6
doi: 10.1117/12.2505392

K. Takiguchi, T. Nakagawa, and T. Miwa, Demultiplexing method of variable capacity optical

OFDM signal using time lens-based optical Fourier transform, IEICE Transactions on Electronics, 査読有, E101-C 巻, 2018, 112-117

doi: 10.1587/transele.E101.C.112

K. Takiguchi, Sub-carrier channel demultiplexing of terahertz-wave OFDM signal assisted by optical technology, Electronics Letters, 査読有, 53 巻, 2017, 1123-1125

doi: 10.1049/el.2017.1844

K. Takiguchi, Demultiplexing method of terahertz-wave OFDM sub-carrier channels using integrated-optic DFT circuit, SPIE Proceedings, 査読有, 10103 巻, 2017, 101031D1-101031D5

doi: 10.1117/12.2251082

〔学会発表〕(計 12 件)

K. Takiguchi, Tunable optical OFDM sub-carrier channel demultiplexer utilizing time lens-based optical Fourier transform, CECNet 2019, 招待講演, 2019 年

田口大暉, 正木秀明, 瀧口浩一, 集積型可変光 OFDM 信号分離デバイスの特性評価, 電子情報通信学会 総合大会, 2019 年

K. Takiguchi, H. Masaki, and T. Taguchi, Integrated-photonics tunable demultiplexer for variable channel number optical OFDM signals, OFC 2019, 2019 年

瀧口浩一, 正木秀明, 田口大暉, 可変光 OFDM 信号分離集積フィルタを用いた可変チャネル数光 OFDM 信号分離実験, 電気関係学会 関西連合大会, 2018 年

K. Takiguchi, Tunable optical OFDM signal demultiplexers, CECNet 2018, 招待講演, 2018 年

K. Takiguchi, Recent progress on integrated-optic demultiplexer for variable symbol rate optical OFDM signal, WCAM 2018, 招待講演, 2018 年

K. Takiguchi, Integrated-optic tunable OFDM signal demultiplexer with small loss variation characteristics, Photonics West 2018, 2018 年

K. Takiguchi, Recent progress on demultiplexer for variable symbol rate optical OFDM communication, EMN Optoelectronics Meeting 2017, 招待講演, 2017 年

池山幸宏, 瀧口浩一, スラプスターカプラ DFT 回路と可変減衰器構成の可変光 OFDM 信号分離集積フィルタ, 電気関係学会 関西連合大会, 2016 年

K. Takiguchi, Integrated-optic demultiplexer for variable capacity optical OFDM signals composed of slab star coupler-type optical DFT circuit and variable optical attenuators, ECOC 2016, 2016 年

K. Takiguchi, T. Nakagawa, and T. Miwa, Tunable optical OFDM signal demultiplexer using time-domain optical Fourier transformation, OSA Advanced Photonics 2016, 2016 年

K. Takiguchi, Recent attempts toward realization of demultiplexer for variable symbol rate optical OFDM signals, EMN Dubai Meeting 2016, 招待講演, 2016 年

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称: 無線信号受信システム

発明者: 瀧口浩一

権利者: 学校法人立命館

種類: 特許

番号: 特願 2018-238149

出願年: 2018 年

国内外の別: 国内

名称: 直交周波数分割多重信号分離システム

発明者: 瀧口浩一

権利者: 学校法人立命館

種類: 特許

番号: 特願 2017-9268

出願年: 2017 年

国内外の別: 国内

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://research-db.ritsumei.ac.jp/Profiles/96/0009524/profile.html>